

УДК 669 72

***А. Н. Гостевская<sup>1</sup>, К. В. Аксенова<sup>1</sup>, В. Е. Громов<sup>1\*</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>2,3</sup>***

Сибирский государственный индустриальный университет

г. Новокузнецк

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Научно-исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

*\*gromov@physics.sibsiu.ru*

Научный руководитель – проф., д-р физ.- мат. наук. *В. Е. Громов*

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ С МАРТЕНСИТНОЙ И БЕЙНИТНОЙ СТРУКТУРАМИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ

### АННОТАЦИЯ

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выполнен сравнительный анализ на различных масштабных уровнях закономерностей эволюции фазового состава и состояния дефектной субструктуры стали с мартенситной и бейнитной структурами при активной пластической деформации до разрушения. Определены зависимости продольных размеров фрагментов кристаллов мартенсита и бейнита, объемной доли частиц цементита, объема материала, скалярной плотности дислокаций от степени деформации. Выявлено, что процесс деформационного старения протекает более интенсивно в стали с бейнитной структурой, чем в закаленной стали.

*Ключевые слова:* сталь, деформация, структура, дислокационная субструктура, эволюция

***A. N. Gostevskaya, K. V. Aksenova, V. E. Gromov, Yu. F. Ivanov***

## DEFORMATION OF MARTENSITIC BAINITE STEEL IS ACCOMPANIED BY CHANGING THE STRUCTURE-PHASE STATE

### ABSTRACT

The comparative analysis of evolution regularities of phase composition steel with martensite and bainite structures under active plastic deformation to failure was done by methods of transmission electron diffraction microscopy at different scale levels. The dependences of longitudinal sizes of fragments of martensite and bainite crystals, volume fraction of cementite particles, scalar density of dislocations on the degree of deformation were defined.

*Keywords:* steel, deformation, structure, dislocation substructure, evolution

В ранних исследованиях [1–3] были проанализированы результаты, полученные при исследовании эволюции дефектной субструктуры и фазового состава закаленной среднеуглеродистой малолегированной конструкционной стали, подвергнутой пластической деформации.

Знание количественных закономерностей и механизмов деформационного упрочнения сталей различных структурных классов при активной пластической деформации необходимо для целенаправленного формирования структурно-фазовых состояний и механических свойств материала. В связи с этим целью настоящей работы является выявление и сравнительный анализ на различных масштабных уровнях закономерностей эволюции фазового состава и состояния дефектной субструктуры стали с мартенситной и бейнитной структурой при активной пластической деформации до разрушения.

Материалом исследования являлись конструкционные стали марки 38ХНЗМФА и 30Х2Н2МФА [4]. Обе стали аустенизировали при температуре 960 °С 1,5 часа и охлаждали в воде (сталь 38ХНЗМФА) или на воздухе (сталь 30Х2Н2МФА). Деформацию стали с мартенситной и бейнитной структурами проводили при комнатной температуре одноосным сжатием со скоростью  $\sim 7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  столбиков размерами 4x4x6 мм<sup>3</sup> на испытательной машине типа «Инстрон-1185» при автоматической записи нагрузки и удлинения. Исследования структуры и фазового состава стали осуществляли методами электронной дифракционной микроскопии тонких фольг (прибор ЭМ-125). Выполненные электронно-микроскопические микродифракционные исследования показали, что в результате указанной выше термической обработки в стали 38ХНЗМФА была сформирована структура пакетного (реечного) мартенсита; в стали 30Х2Н2МФА – структура нижнего бейнита.

Нижний бейнит характеризуется выделениями цементита внутри ферритных реек. Реечный мартенсит низко- и среднеуглеродистых сталей в процессе закалки практически всегда подвергается «самоотпуску» [1–7], вследствие чего преимущественно в объеме кристаллов обнаруживаются частицы цементита. В отличие от структуры нижнего бейнита, частицы цементита, расположенные в кристаллах мартенсита, ориентированы в трех кристаллографически эквивалентных направлениях.

Исследования показали, что частицы цементита имеют игольчатую (пластинчатую) форму. Средние размеры частиц цементита, расположенных в объеме кристаллов мартенсита: поперечные – 7,6 нм,

продольные – 85 нм; расположенных в пластинах нижнего бейнита: поперечные – 25 нм, продольные – 200 нм.

Таким образом, исследуемые стали в исходном состоянии имеют реечную (пакетную) структуру, сформировавшуюся по сдвиговому механизму  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения. В объеме реек присутствуют частицы цементита (более крупные – в стали 30Х2Н2МФА с бейнитной структурой) и дислокационная субструктура, скалярная плотность дислокаций которой выше в стали 38ХН3МФА.

Деформация закаленной стали, вплоть до разрушения материала, не приводит к разрушению пакетной (реечной) структуры. Деформация стали с бейнитной структурой сопровождается разрушением границ реек.

Деформация стали сопровождается уменьшением продольных размеров фрагментов путем деления фрагментов формирующимися субграницами. При этом в кристаллах мартенсита этот процесс протекает более интенсивно.

Пластическая деформация исследуемых сталей сопровождается деформационным микродвойникованием. На протяжении деформирования плотность микродвойников возрастает, но скорость изменения этой характеристики зависит от структуры стали. А именно, по сравнению со сталью с бейнитной структурой, в стали с мартенситной структурой относительное содержание кристаллов с микродвойниками и интенсивность микродвойникования при сравнимых степенях деформации существенно выше.

Деформация стали сопровождается существенным преобразованием карбидной подсистемы материала. Во-первых, изменяется морфология частиц – исходно иглообразные частицы (частицы, расположенные в объеме кристаллов мартенсита и нижнего бейнита) или тонкие прослойки (частицы, расположенные на границах кристаллов и их пакетов) превращаются на последней стадии деформации в эллипсоидальные.

Во-вторых, наблюдается изменение объемной доли частиц цементита. В закаленной стали с увеличением степени деформации объемная доля цементита уменьшается. В стали с бейнитной структурой выявлено изменение места расположения частиц цементита: с увеличением степени деформации объемная доля частиц, расположенных на границах пластин бейнита, увеличивается.

Сравнивая количественные закономерности эволюции карбидной фазы в стали с мартенситной и бейнитной структурами видно, что в стали со структурой нижнего бейнита процесс деформационного старения протекает более интенсивно, чем в закаленной стали.

Таким образом, установлено, что пластическая деформация одноосным сжатием стали с мартенситной и бейнитной структурами сопровождается взаимосвязанной эволюцией фазового состава и дефектной субструктуры материала, проявляющейся на макро-, мезо-, микро- и нано- структурных уровнях.

Показано, что деформация стали сопровождается растворением частиц цементита, образовавшихся в процессе бейнитного превращения или самоотпуска мартенсита, переходом атомов углерода на дефекты кристаллической решетки стали. Установлено, что в стали с бейнитной структурой процесс деформационного старения протекает более интенсивно, чем в закаленной стали.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов В. Г., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращения в железе и стали – М.: Наука, 1977. С. 236.
2. Счастливцев В. М., Мирзаев Д. А., Яковлева И. Л. Структура термически обработанной стали – М.: Metallurgy, 1994. С. 288.
3. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов – М.: Metallurgy, 1986. С. 526.
4. Приданцев М. В., Давыдова Л. Н., Тамарина А. М. Конструкционные стали: Справочник – М.: Metallurgy, 1980. С. 288.
5. Закаленная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения / Иванов Ю. Ф. [и др.] // Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. С. 173.
6. Formation of the fine structure and phase composition of structural steel on quenching / Yu.F. Ivanov [et. al.] // Steel in translation– 2009. Vol. 39, № 4. P. 302–306.
7. Структурнофазовые превращения в закаленной конструкционной стали при деформации / Ю. Ф. Иванов [и др.] // Успехи физики металлов 2009. Т. 10, №4. С. 389–415.